

УДК 621.391

И.К. ВАСИЛЬЕВА, М.Ф. БАБАКОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ОСАДКОВ

Проведено исследование зависимости поляризационных параметров гидрометеорологических объектов, полученных путем моделирования, от интенсивности осадков, длины волны излучения, температуры, среднего угла наклона и степени упорядоченности частиц в ансамбле. Выполнен предварительный анализ информационных возможностей параметров для прогнозирования вида и интенсивности осадков, распознавания областей формирования града и грозоопасных зон по радиолокационным данным.

осадки, структурные факторы, поляризационные параметры, математическая модель

Введение

Трудности, возникающие при разработке алгоритмов распознавания гидрометеорологических образований (ГМО) по данным дистанционного зондирования (ДЗ), связаны, прежде всего, с неоднозначностью определения класса ГМО, обусловленной статистическим характером их поляризационных признаков (ПП). Поляризационные характеристики сигнала, рассеянного ансамблем частиц ГМО, зависят от множества факторов: длины волны излучения, диэлектрических свойств, формы, размера, концентрации, ориентации частиц и т.д. Известно, что диэлектрическая проницаемость зависит от фазового состояния, плотности частиц, длины волны и температуры. Размеры и число частиц в единице объема связаны с интенсивностью ГМО, причем вид этой зависимости обусловлен классом ГМО. В свою очередь, размеры и форма частиц большинства классов ГМО также связаны между собой либо детерминированным образом (в случае капельных ГМО), либо статистически (для частиц ледяной крупы, агрегатов кристаллов). Распределение углов наклона частиц считается нормальным [1], а значения параметров закона распределения зависят от класса ГМО. Таким образом, целью работы являлось исследование влияния указанных факторов на ПП. По результатам моделирования в приближении Рэлея

[1] элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) \hat{S} [2] определялись ПП и строились зависимости оценки их математического ожидания (МО) от входного параметра модели. После аппроксимации Sb-распределением Джонсона [3] гистограмм ПП, находились вторичные оценки МО и среднеквадратического отклонения (СКО). Если смещение выборочной оценки МО ПП не превышало СКО его закона распределения, то данный параметр считался малочувствительным, т.к. по его значению невозможно оценить с достаточной достоверностью величину влияющего фактора. При этом для построения статистической модели ПП отпадала потребность проводить интегрирование по диапазону возможных значений такого фактора.

Поляриметрические параметры

ПП, определяемые на основе ПМР в ортогонально-линейном (h, v) поляризационном базисе

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} \exp(j\varphi_{hh}) & S_{hv} \exp(j\varphi_{hv}) \\ S_{vh} \exp(j\varphi_{vh}) & S_{vv} \exp(j\varphi_{vv}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

при $\hat{S}_{hv} = \hat{S}_{vh}$,

условно можно разделить на следующие группы:

– абсолютные амплитудные:

1) HH , HV , VV – модули \hat{S}_{ij} , дБ [2];

– относительные амплитудные:

1) коэффициенты деполаризации [4]:

$$CDH = 10 \lg \left(\frac{|\dot{S}_{hv}|}{|\dot{S}_{hh}|} \right); \quad CDV = 10 \lg \left(\frac{|\dot{S}_{hv}|}{|\dot{S}_{vv}|} \right); \quad (2)$$

2) коэффициент асимметрии [4]:

$$CAS = 10 \lg \left(\frac{|\dot{S}_{hh}|}{|\dot{S}_{vv}|} \right); \quad (3)$$

3) коэффициент анизотропии [4]:

$$CAN = \left(\frac{|\dot{S}_{hh}| - |\dot{S}_{vv}|}{|\dot{S}_{hh}| + |\dot{S}_{vv}|} \right); \quad (4)$$

– абсолютные мощностные:

1) $|R_{ij}|$ – модули элементов ковариационной

матрицы рассеяния (КМР), дБ [5];

2) EV_1, EV_2 – модули собственных чисел ПМР Λ_1 и Λ_2 , дБ [2];

3) коэффициент параметра формы, дБ [2]:

$$SFC = 0,5 \left[\frac{|\dot{S}_{hh} - \dot{S}_{vv}|^2 + 2|\dot{S}_{hv} - \dot{S}_{vh}|}{\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2} \right]; \quad (5)$$

4) Y_1 – параметр средней мощности, дБ:

$$Y_1 = 0,25(R_{11} + R_{33} + \dot{R}_{13} + \dot{R}_{31}); \quad (6)$$

5) Y_2 – параметр дисперсии мощности, дБ:

$$Y_2 = 0,25(R_{11} + R_{33} - \dot{R}_{13} - \dot{R}_{31}) + R_{22}; \quad (7)$$

6) $|Y_3|$ – модуль параметра Y_3 , дБ:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \dot{Y}_3 &= (R_{33} - R_{11}) / [4 \cos 2\langle \beta \rangle \exp(-2\langle D_\beta \rangle)]; \\ \operatorname{Im} \dot{Y}_3 &= \operatorname{Im} \dot{R}_{31} / [2 \cos 2\langle \beta \rangle \exp(-2\langle D_\beta \rangle)], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\langle \bar{\beta} \rangle$ – оценка среднего угла наклона частиц:

$$\langle \bar{\beta} \rangle = 0,5 \arctg [2 \operatorname{Re}(\dot{R}_{21} + \dot{R}_{32}) / (R_{33} - R_{11})]; \quad (9)$$

$\langle D_\beta \rangle$ – оценка дисперсии угла наклона частиц:

$$\langle D_\beta \rangle = -\frac{1}{8} \ln \frac{R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} - 4R_{22}}{(R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31} + 4R_{22}) \cos 4\langle \beta \rangle}; \quad (10)$$

7) Z_h, Z_v – параметры отражаемости при Н и V-зондировании соответственно, дБЗ [6];

8) Z_{dp} – разностная отражаемость, дБЗ [6];

9) H_{dr} – дифференциальная отражаемость градового сигнала, дБ [5, 6];

– относительные мощностные:

1) TAN – параметр истинной анизотропии [4];

$$TAN = (\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2) / (\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2); \quad (11)$$

2) AN – параметр асимметричности, дБ:

$$AN = 10 \lg \left[\frac{(|\dot{S}_{hh}| - |\dot{S}_{vv}| + 2|\dot{S}_{hv}|) |\dot{S}_{hh}|}{(|\dot{S}_{hh}| + |\dot{S}_{vv}|) |\dot{S}_{vv}|} \right]; \quad (12)$$

3) HGM – модуль параметра γ , град [7];

4) EP_1, EP_2 – модули фазовых собственной поляризации, дБ [2, 4];

5) DDT – отношение детерминанта к следу ПМР, дБ [2];

6) EVR – модуль отношения Λ_1 и Λ_2 ;

7) I_1 – отношение Y_2 и Y_1 , дБ [5];

8) $|I_2|$ – модуль отношения \dot{Y}_3 и Y_1 , дБ [5];

9) Z_{dr} – дифференциальная отражаемость [6];

10) LDR_h, LDR_v – линейные деполаризационные отношения, дБ [6];

– фазовые:

1) $\arg HH, \arg HV, \arg VV, \arg R_{ij}$ – аргументы

ПМР и КМР, рад [2, 5];

2) разности фаз [2]:

$$FH = 180(\varphi_{hh} - \varphi_{hv}) / \pi; \quad FV = 180(\varphi_{vh} - \varphi_{vv}) / \pi; \quad (13)$$

3) EF_1, EF_2 – аргументы Λ_1 и Λ_2 ;

4) EFS – сумма EF_1 и EF_2 , град [2];

5) EFD – разность EF_1 и EF_2 , град [2];

6) HGF – аргумент параметра γ , град [7];

7) DTA – аргумент детерминанта ПМР [2];

8) DPS – дифференциальный фазовый сдвиг (определяется по аргументу коэффициента корреляции ρ_{hv}) [6];

$$\dot{\rho}_{hv} = \dot{S}_{vv} \dot{S}_{hh}^* / \left(\sqrt{|\dot{S}_{vv}|^2} \sqrt{|\dot{S}_{hh}|^2} \right); \quad (14)$$

9) $\arg \dot{\rho}_{xh}, \arg \dot{\rho}_{xv}$ – аргументы взаимных корреляционных коэффициентов для сигналов с основной и перекрестной поляризацией при Н и V-зондировании, соответственно [8];

– поляризационного эллипса, или угловые ПП:

1) ELH, ELV, ORH, ORV – углы эллиптичности и ориентации отраженных сигналов при Н и V поляризации зондирования [2, 4];

2) ZE_1, ZE_2, ZO_1, ZO_2 – углы эллиптичности и ориентации нулевого сигнала [2, 4];

3) EE_1, EE_2, EO_1, EO_2 – углы эллиптичности и ориентации собственной поляризации [2, 4].

При интерпретации полученных по (9) оценок среднего угла наклона следует учитывать, что функция \arctg возвращает значения в диапазоне $[-\pi, \pi]$, поэтому если $\beta \notin [-\pi/2, \pi/2]$ (например, при $\sigma_\beta > 30^\circ - \bar{\beta}/3$) возникает систематическая погрешность оценки МО. Если $\bar{\beta}$ близко к 0° , то $\langle \bar{\beta} \rangle$ даже при большой дисперсии угла наклона смещается незначительно (рис. 1, 2), что объясняется зеркальным относительно $\bar{\beta}$ отражением участков функции распределения $\langle \bar{\beta} \rangle$, выходящих за границы указанного интервала.

Поскольку величины углов наклона связаны с внешними воздействиями: направлением потоков воздуха, определяемым как горизонтальной скоростью ветра, так и скоростью падения частиц, зависящей от интенсивности ГМО, размера частиц, атмосферного давления, влажности и температур, то возможность использования $\langle \bar{\beta} \rangle$ и $\langle \sigma_\beta \rangle$ для идентификации класса ГМО вызывает сомнения.

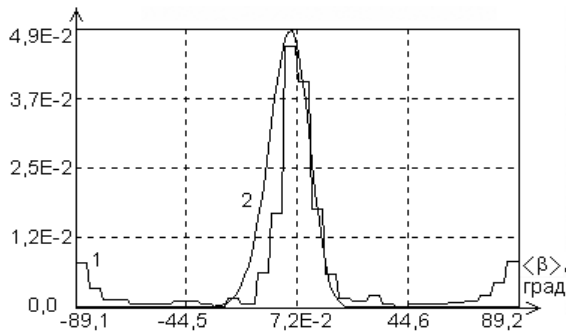


Рис. 1. Гистограмма (1) и плотность распределения (2) оценки среднего угла наклона градин ($\sigma_\beta = 6^\circ$)

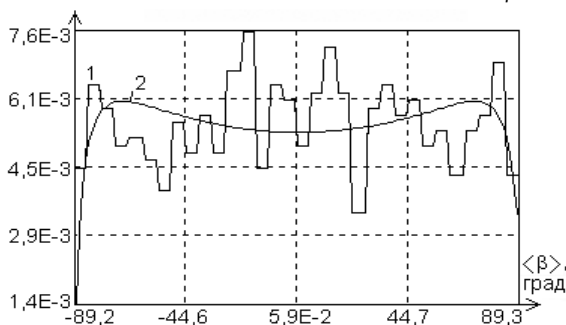


Рис. 2. Гистограмма (1) и плотность распределения (2) оценки среднего угла наклона градин ($\sigma_\beta = 56^\circ$)

Зависимость ПП от длины волны

С увеличением длины волны от 1 до 30 см абсолютные амплитудные ПП (кроме SFC) уменьшаются на 28...30 дБ, т.е. обратно пропорционально λ^2 (рис. 3, 4), абсолютные мощностные ПП – на 58...68 дБ. Параметры радиолокационной отражаемости $Z_{h,v}, Z_{dp}, H_{dr}$ в явном виде от λ не зависят (по определению); отклонения от среднего значения (до ± 1 дБЗ), характерные для осадков в жидком фазовом состоянии, могут быть связаны с изменением диэлектрической проницаемости воды.

Относительные ПП практически не зависят от λ ; отклонения от среднего не превышают 0,4 дБ. Низкие значения большинства ПП для сухого снега ($\rho_s = 10 \text{ кг/м}^3$) обусловлены его слабыми диэлектрическими свойствами, а также выбором квазисферической модели для описания формы снежинок.

Колебания фазовых ПП при изменении λ , как правило, носят скачкообразный характер, причем отклонения от среднего составляют $10^{-3} \dots 10^{-1}$ рад.

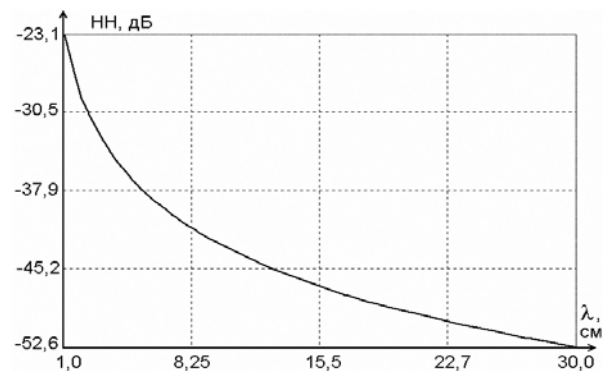


Рис. 3. Вид зависимости абсолютных амплитудных ПП от длины волны

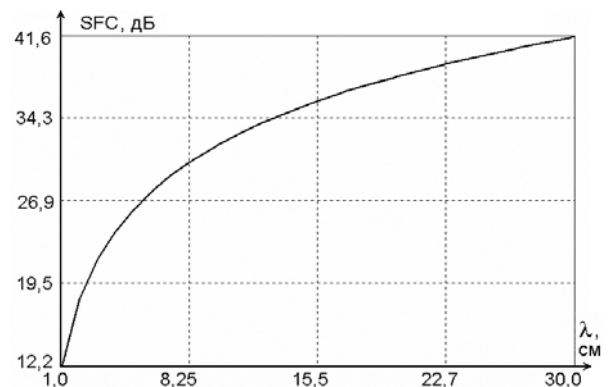


Рис. 4. Зависимость SFC от длины волны

Зависимость от λ угловых ПП также отсутствует, или выражена очень слабо. Диапазон изменения МО не превышает 6° ; отклонения от среднего максимальны для EO_1, EO_2 .

Можно заключить, что от λ существенно зависят только абсолютные ПП. Эта зависимость известна и отражена в формулах для расчета элементов ПМР. Таким образом, несмотря на то, что дальнейшие исследования зависимостей ПП от влияющих факторов проводились при фиксированной длине волны $\lambda = 3,2$ см, соответствующей рабочей частоте бортовых метеонавигационных комплексов, полученные результаты можно распространить на весь диапазон λ , в котором применимо приближение Рэлея.

Зависимость ПП от температуры

Диапазон изменения температуры t для ГМО в жидком фазовом состоянии был принят $0...29^\circ\text{C}$, для крупы, града и снега – $-29...0^\circ\text{C}$. Результаты моделирования показали, что изменения t практически не влияют на величину МО ПП. Наиболее чувствительны к t фазовые ПП, однако изменения их МО носят скачкообразный характер, а диапазон изменения незначителен и находится в пределах СКО ПП, что не позволяет использовать эти параметры в качестве индикативных признаков для оценки фактора t . Так, максимальное отклонение от среднего значения FH, FV составляет $\pm 1,5^\circ$. Отклонения от МО EF_1, EF_2 для жидких ГМО находятся в пределах $\pm 0,5...1^\circ$, а для снега – $\pm 5...6^\circ$.

Влияние на ПП МО угла наклона

Принято считать, что в ГМО средний угол наклона капель $\bar{\beta} = 7...12^\circ$, а для ледяной крупы, града, пластинчатых ледяных кристаллов и снега $\bar{\beta} \approx 0^\circ$. Тем не менее, для анализа влияния угла β на значения ПП для всех классов был принят одинаковый диапазон варьирования $\bar{\beta} = 0...58^\circ$, для учета возможных отклонений МО угла наклона от среднестатистических данных.

В группу ПП, чувствительных к $\bar{\beta}$, входят $\langle \bar{\beta} \rangle, EFD, HGF, EO_1, EO_2$. Связь $\langle \bar{\beta} \rangle$ и $\bar{\beta}$ (см. рис. 5) для жидких ГМО имеет выраженный линейный характер вида:

$$\bar{\beta} = k \cdot \langle \bar{\beta} \rangle - b.$$

Так, для дождя $k = 1,32$ и $b = 1,27$; для ливня $k = 1,21$ и $b = 4,24$; для грозы $k = 1,16$ и $b = 2,78$. Для твердых ГМО эта зависимость почти линейна до $\sigma_\beta \approx 28^\circ$; при дальнейшем увеличении СКО расчеты среднего угла наклона дают существенно заниженные оценки. Оценки МО $\langle \bar{\beta} \rangle$, полученные после аппроксимации гистограмм, точнее воспроизводят модельные значения $\bar{\beta}$, т.к. при этом отбрасываются случайные выбросы данных.

Зависимости вторичных оценок МО EO_1 от $\bar{\beta}$ для различных классов показаны на рис. 6.

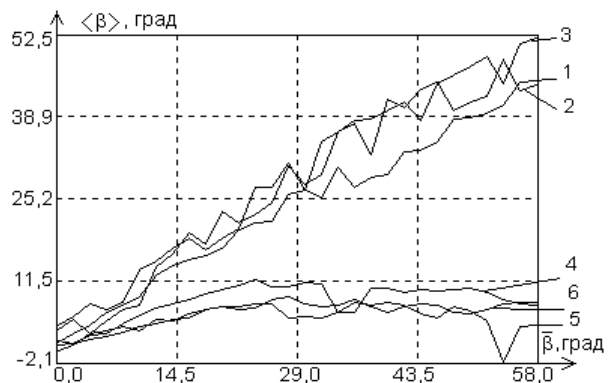


Рис. 5. Зависимость оценки $\langle \bar{\beta} \rangle$ от величины $\bar{\beta}$:

1 – дождь; 2 – ливень; 3 – гроза; 4 – крупа;
5 – град; 6 – снег

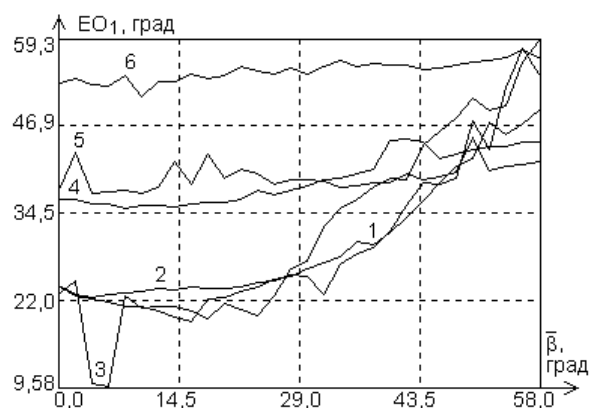


Рис. 6. Зависимость EO_1 от МО угла наклона:

1 – дождь; 2 – ливень; 3 – гроза; 4 – крупа;
5 – град; 6 – снег

Влияние на ПП СКО угла наклона

Капли имеют более упорядоченную ориентацию, чем ледяные частицы, поэтому для жидких ГМО был принят диапазон варьирования СКО угла наклона σ_β 5...30°, для твердых – 6...58°. Наиболее чувствительны к σ_β EO_1 (МО возрастает на 10...25°), EO_2 (МО уменьшается на 15...30°), $\langle \bar{\beta} \rangle$ и $\langle \sigma_\beta \rangle$. Для жидких ГМО с увеличением σ_β МО $\langle \sigma_\beta \rangle$ возрастает, для твердых ГМО МО $\langle \sigma_\beta \rangle$ растет до $\sigma_\beta \approx 30^\circ$ и далее практически не изменяется.

На рис. 7, представляющем вид зависимости $\langle \bar{\beta} \rangle$ от σ_β в дожде ($\bar{\beta} = 10^\circ$), показано, что с увеличением σ_β погрешность оценки МО β по абсолютной величине возрастает. Для ГМО в твердой фазе эта зависимость имеет немонотонный характер.

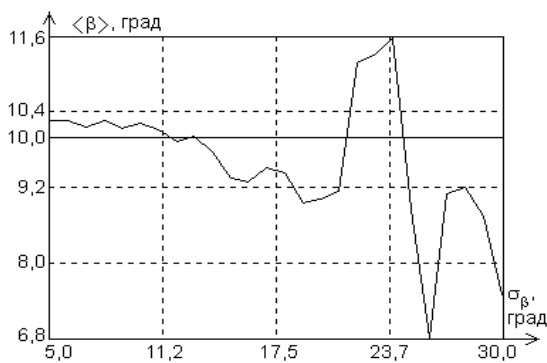


Рис. 7. Влияние СКО угла наклона капель на $\langle \bar{\beta} \rangle$

Зависимость ПП от обводненности ледяных частиц

Диапазон варьирования доли жидкой воды в объеме ледяных частиц $p_w = 0...1$ для крупы и града соответствовал состояниям частиц от полностью сухих до мокрых, обводненных и тающих, приближающихся по своим диэлектрическим свойствам к каплям воды. В случае снега варьировалась его плотность $\rho_s = 10...800 \text{ кг/м}^3$.

Для ПП, чувствительных к p_w (ρ_s), характерно

то, что диапазон их изменения в снеге в несколько раз выше, чем в граде и крупе. Так, МО EF_1 , EF_2 в граде и крупе с ростом p_w почти не изменяются ($\Delta = \pm 2^\circ$), в снеге же они возрастают на 40°. При увеличении p_w МО SFC в граде и крупе уменьшается на 0,5...1 дБ, а в снеге возрастает на 22 дБ. Вид зависимости МО AN от p_w (ρ_s) показан на рис. 8.

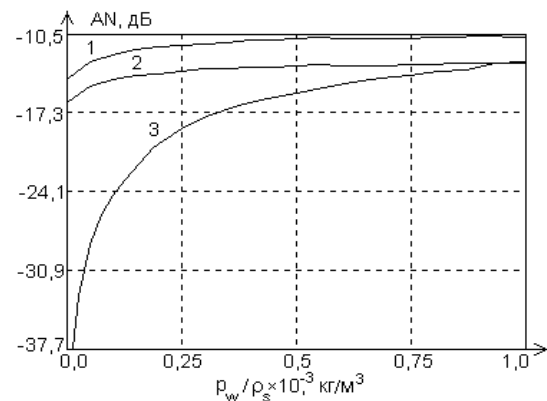


Рис. 8. Зависимость МО AN от доли воды в объеме ледяных частиц p_w (или плотности снега ρ_s):
1 – крупа; 2 – град; 3 – снег

Зависимость ПП от интенсивности

Исследовались типичные для различных классов диапазоны интенсивности R , мм/ч: для дождя – 1...35; ливня – 5...50; грозы – 5...100; крупы – 0,5...10; града – 0,5...50; снега – 0,5...10.

К независимым от R можно отнести фазовые ПП, так как их изменения (1...20°) носят скачкообразный характер. Малочувствительны к R относительные ПП; наибольшие отклонения от среднего дают $LDR_{h,v}$, I_1 ($\Delta = \pm 6,5$ дБ – в снеге, $\Delta = \pm 1,2$ дБ – в ливне). Из угловых параметров наиболее чувствительны к R EO_1 и EO_2 . МО EO_2 в снеге возрастает от -41° до -20° , однако для остальных классов осадков диапазон изменения существенно ниже: от 6° (в граде) до 10° (в грозе).

К сильно зависящим от R относятся абсолютные амплитудные ПП (табл. 1). Из их числа можно отметить Z_h (рис. 9), Z_v , H_{dr} , которые мало зависят от других влияющих факторов и, следова-

Таблица 1

Динамика изменения параметров, чувствительных к интенсивности осадков

Параметр	Направление ($\uparrow\downarrow$) и величина изменения МО параметра					
	дождь	ливень	гроза	крупа	град	снег
R , мм/ч	1...35	5...50	5...100	5...10	0,5...50	0,5...10
HH , VV , дБ	\uparrow 11...12	\uparrow 5...5,5	\uparrow 17...18	\uparrow 11...12	\uparrow 13...14	\uparrow 14...14,5
HV , дБ	\uparrow 15...16	\uparrow 5...6	\uparrow 19	\uparrow 9...9,5	\uparrow 15...15,5	\uparrow 7...8
H_{dr} , Y_1 , Z_h , Z_v , дБ (дБЗ)	\uparrow 24...25	\uparrow 9,5...10	\uparrow 33...34	\uparrow 23...24	\uparrow 26,5...27	\uparrow 28...28,5
$ Y_3 $, Z_{dp} , дБ (дБЗ)	\uparrow 28...29	\uparrow 10...11	\uparrow 35...36	\uparrow 20...21	\uparrow 28...29	\uparrow 21...22
R_{22} , Y_2 , дБ	\uparrow 32...34	\uparrow 10...12	\uparrow 38...39	\uparrow 18,5...19	\uparrow 30...30,5	\uparrow 15...16
EV_1 , EV_2 , дБ	\uparrow 27...28	\uparrow 10...11	\uparrow 38...39	\uparrow 26...27	\uparrow 30...31	\uparrow 32...33
SFC , дБ	\downarrow 7...8	\downarrow 3...4	\downarrow 14...15	\downarrow 14...15	\downarrow 10...11	\downarrow 20...21

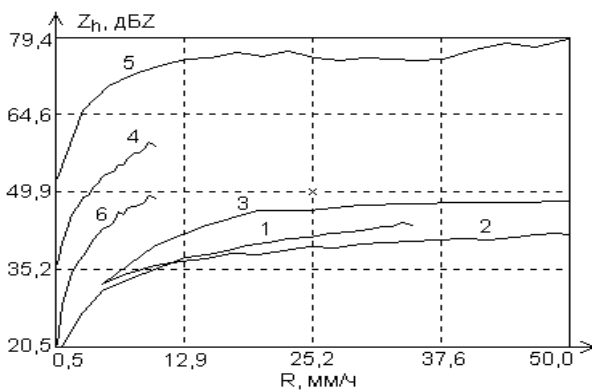


Рис. 9. Зависимость Z_h от интенсивности осадков:
 1 – дождь; 2 – ливень; 3 – гроза; 4 – крупа;
 5 – град; 6 – снег

тельно, являются индикативными показателями интенсивности осадков по данным ДЗ.

Заключение

Анализ результатов моделирования ПП осадков показал, что наиболее перспективными для распознавания ГМО по данным ДЗ являются относительные и угловые ПП, поскольку они не зависят от λ , не критичны к погрешностям определения импульсного объема РЛС и малочувствительны к колебаниям структурных и интегральных характеристик ГМО. Информативные возможности фазовых ПП сомнительны, поскольку МО этих параметров для всех моделируемых классов и по всему исследуемому диапазону входных параметров модели, относящихся к внешним воздействиям и структурным характеристикам, как правило, принимают близкие к нулю и переменные по знаку значения, а ширина их законов распределения (кроме DPS) составляет около 360° .

Литература

1. Попов А.В., Васильева И.К. Моделирование поляризационных признаков гидрометеорологических образований // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – № 1 (5). – С. 17 – 26.
2. Канарейкин А.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
3. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 369 с.
4. Popov A.V., Pogrebnyak O. Informativity of polarimetric radar invariants // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5151. – P. 74 – 84.
5. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – № 4. – 1993. – С. 18 – 28.
6. Straka J.M., Zrnicek D.S., Ryzhkov A.V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 39. – P. 1341 – 1372.
7. Huynen J.R. Phenomenological theory of radar targets // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653 – 712.
8. Ryzhkov A., Zrnicek D., Hubbert J. et al. Interpretation of polarimetric radar covariance matrix for meteorological scatterers // Proc. IEEE. – 2000. – P. 721 – 725.

Поступила в редакцию 23.07.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», Харьков.